

Technology
实用技术

活学活用
电子技术

CMOS电路 活用技巧

〔日〕大幸秀成 著
彭军 译

 科学出版社

活学活用电子技术

CMOS 电路活用技巧

〔日〕大幸秀成 著

彭 军 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2012-0415 号

内 容 简 介

本书以 CMOS 的最小构成电路反相器为焦点,介绍 CMOS 器件的特点、结构、设计规则及制造方法。以标准逻辑电路为例,介绍了组合逻辑电路、时序逻辑电路的定义、基本电路结构及其应用举例。进而,介绍了接口的技巧和目前备受关注的模拟技术等。本书还涉及大规模集成电路(LSI)的话题,介绍其分类及发展趋势,以及 ASIC 和存储器的基本技术。

本书可供半导体制造行业的技术人员阅读,也可供电子等相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

CMOS 电路活用技巧/(日)大幸秀成著;彭军译. —北京:科学出版社, 2012

(活学活用电子技术)

ISBN 978-7-03-034136-5

I. C… II. ①大…②彭… III. CMOS 电路-基本知识 IV. TN432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 079281 号

责任编辑:杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 瑾

责任印制:赵德静 / 封面设计:卢雪娇

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳艺恒彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 1—4 000 字数: 218 000

定 价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

CMOS no Kiso to Katsuyou Nouhou

By Hideaki Daiko

Copyright © 2008 by Hideaki Daiko All rights reserved.

Originally published in Japan by CQ Publishing Co., Ltd., Japan.

Chinese(in simplified character only)translation rights arranged with

CQ Publishing Co., Ltd., Japan.

CMOSの基礎と活用ノウハウ

大幸秀成 CQ出版株式会社 2008

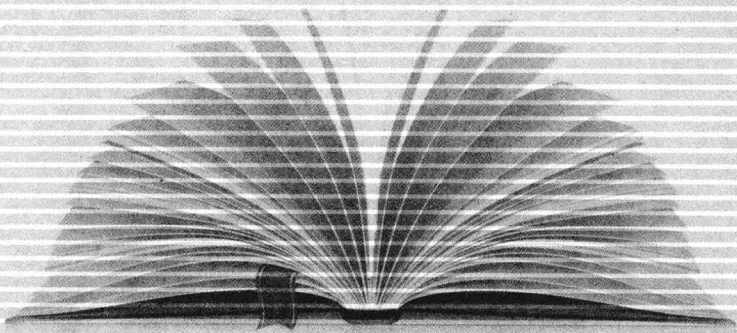
著 者 簡 介

大幸秀成

1982年毕业于爱媛大学电气工程专业,进入东京芝浦电气株式会社(现在的东芝)半导体事业本部,从事 CMOS 技术的标准逻辑工作。致力于推进日本与欧美厂商的产品共同开发及全球标准化。现在依然从事和 CMOS 相关的产品开发及技术市场工作。

主要著作:

《基本・C-MOS 標準ロジック IC 活用マスタ》(CQ 出版社)



前言

现代社会中,半导体已经成为电子设备工作的核心部件。其中,CMOS 器件具有功率消耗低、工作电压范围宽的优秀品质,而且半导体制造技术已经进入微细化、高集成化,使得电子设备能够在小型化、薄型化的同时,实现高功能、高性能化。就是说,CMOS 器件作为能够实现高性价比的半导体技术在飞速地发展。

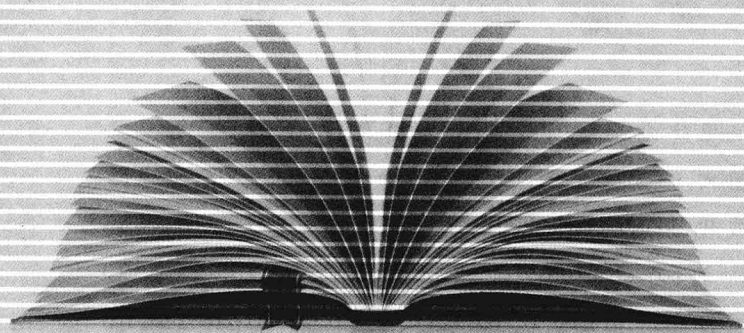
本书编入了许多实用性强的内容,大量使用了易懂的图表,并且进行详细的解说。对于初次学习半导体的读者来说,能够学习到有关 CMOS 器件方面的基本知识;对于已经具备了半导体基本知识的读者来说,能够学习到有关 CMOS 电路的工作和使用方面的技巧。

本书首先以典型的电子设备为例,介绍半导体的分类与发展方向。其次以 CMOS 的最小构成电路反相器为焦点,介绍 CMOS 器件的特点、结构、设计规则及制造方法。以标准逻辑电路为例,介绍组合逻辑电路、时序逻辑电路的定义、基本电路结构及其应用举例。因为标准逻辑电路是一种在世界各地都可以获得的通用产品,所以很容易进行实验验证。最后,介绍接口的技巧和目前备受关注的模拟技术等。另外本书还涉及大规模集成电路(LSI)的话题,介绍其分类及发展趋势,以及 ASIC 和存储器的基本技术。

本书适合于使用半导体器件的初学者,以及半导体制造行业中希望继续学习 CMOS 应用技巧的技术人员。作者执笔的动机,是希望能够解答从 CMOS 器件的基础知识到初级应用范围的各种疑问,作为一本能够起到立竿见影效果的实用书,奉献给各位读者。

大幸秀成

2008 年 2 月



目 录

第 1 章	CMOS 器件的现状	1
1.1	半导体器件的分类	1
1.2	CMOS 器件的特征	3
1.3	CMOS 产品的种类和特点	6
第 2 章	CMOS 的结构	13
2.1	CMOS 的结构	13
2.2	设计规则	17
2.3	CMOS 的制造工程	20
2.3.1	衬底材料的制作	20
2.3.2	前工序	21
2.3.3	后工序	23
第 3 章	CMOS 的基本特性与逻辑电路的基本结构	27
3.1	CMOS 的基本特性	27
3.1.1	N-ch MOS FET 的特性表达式	29
3.1.2	P-ch MOS FET 的特性表达式	30
3.1.3	CMOS 反相器的特性	31
3.1.4	逻辑阈值电压	33
3.1.5	过渡区中的输出电压	33
3.1.6	电阻近似	33
3.2	CMOS 的特点	34
3.2.1	功率消耗小	35



3.2.2	能够在低电压下工作/工作电压范围宽	36
3.2.3	噪声余量大	37
3.2.4	容易集成化	38
3.2.5	输入阻抗高	39
3.2.6	基于输入电容的初次记忆	40
3.3	基本逻辑电路	42
3.4	正逻辑与负逻辑	43
3.5	基本电路	43
3.5.1	反相器	43
3.5.2	NAND 门	44
3.5.3	NOR 门	44
3.5.4	AND,OR 门	45
3.5.5	传输门	45
3.5.6	时钟脉冲门	46
3.5.7	Exclusive OR/NOR 门	47
3.5.8	触发器	47
3.6	CMOS 的保护电路	47
3.6.1	输入保护电路	47
3.6.2	输出的保护	49
3.6.3	电源/GND 浮动时的保护	49
第4章	CMOS 器件的种类与特征	51
4.1	CMOS 标准逻辑	51
4.1.1	双极逻辑的诞生	52
4.1.2	CMOS 逻辑的诞生	54
4.2	74 *** 型的魅力	57
4.2.1	BiCMOS 逻辑的特征	57
4.2.2	ECL 的特征	57
4.2.3	ASIC 的问世与标准逻辑的需要	58
4.2.4	单门逻辑的诞生	58
4.2.5	低电压化的趋势	59



4.2.6 封装的发展趋势	59
4.3 存储器	61
4.3.1 ROM	62
4.3.2 RAM	65
4.4 ASIC 的种类与特征	67
4.4.1 ASIC 化的潮流	68
4.4.2 半定制	69
4.4.3 PLD	72
4.4.4 门阵列	72
4.4.5 标准单元	72
4.4.6 全定制 LSI	73
4.5 半定制 LSI 的设计方法	74
第 5 章 标准逻辑 IC 的功能与使用方法	77
5.1 组合逻辑电路	77
5.1.1 门电路	77
5.1.2 门电路的应用举例	78
5.1.3 特殊门电路	86
5.1.4 开路漏极	90
5.1.5 模拟开关	93
5.1.6 总线缓冲器	96
5.1.7 双向总线缓冲器	97
5.1.8 总线缓冲器与总线的连接	99
5.1.9 多路转换器/逆多路转换器/选择器	100
5.1.10 在多变数 1 输出逻辑电路中的应用	100
5.1.11 译码器/编码器	102
5.1.12 使用译码器的 CPU 周边 LSI 的选择	104
5.2 时序逻辑电路	105
5.2.1 锁存器	105
5.2.2 锁存器的应用举例	107
5.2.3 总线数据的暂存记忆	108



5.3 触发器	109
5.3.1 触发器的动作	110
5.3.2 触发器的应用举例	114
5.3.3 总线的数据分配和保持电路	115
5.3.4 计数器	116
5.3.5 计数器的串级连接举例	119
5.3.6 移位寄存器	121
5.3.7 移位寄存器的应用举例	122
5.3.8 单稳多谐振荡器	129
5.3.9 单稳多谐振荡器的应用举例	133
第6章 CMOS 逻辑 IC 的特性	137
6.1 CMOS 器件的接口	141
6.2 CMOS 器件的标准接口	142
6.2.1 CMOS 的输入输出特性	142
6.2.2 CMOS 电平与 TTL 电平	144
6.2.3 CMOS 电平的趋势	146
6.3 接口的专门技术	147
6.3.1 扇出端数	147
6.3.2 三态输出与输出冲突	150
6.3.3 上冲/下冲,反射,激振噪声	152
6.3.4 线连“或”电路与从低电压向高电压的电平变换	155
6.4 电压变换接口	155
6.4.1 从高电压向低电压变换的接口	155
6.4.2 输出的容忍功能	157
6.4.3 从低电压向高电压变换的接口	159
6.4.4 高→低/低→高双向电压变换接口	161
6.5 冒 险	162
6.5.1 冒险引起的故障	163
6.5.2 晶体管与 CMOS 逻辑的接口	166
6.5.3 高速接口(单端与差动传送)概要	170



6.5.4 单 端	171
6.5.5 差动传送(异动)	172
第 7 章 CMOS 器件的失效模式	175
7.1 器件自身的失效	175
7.1.1 早期失效	176
7.1.2 偶然失效	176
7.1.3 耗损失效	177
7.2 失效模式	177
7.3 外来因素引起的失效	177
7.3.1 ESD 造成的损伤	178
7.3.2 闩锁造成的损伤	182
第 8 章 器件模拟与传输模拟	191
8.1 SPICE 与 IBIS	191
8.1.1 SPICE	192
8.1.2 IBIS	193
8.1.3 IMIC	194
8.2 LSI 设计流程	194
8.3 基于 SPICE 的器件/电路模拟	195
8.3.1 器件模拟	195
8.3.2 电路模拟	197
8.3.3 SPICE 模拟器的功能	198
8.4 传输模拟	198
8.4.1 数字信号的误解	199
8.4.2 信号完整的基础——方波是危险的	200
8.4.3 传输信号的高速化技巧	204
8.4.4 传输线的等效电路	205
8.4.5 基于 IBIS 的传输模拟	206
8.4.6 EMI 的法规	212
参考文献	215



第 1 章

CMOS 器件的现状

1.1 半导体器件的分类

半导体器件是一种电子部件。运用几微米至几十纳米¹⁾的所谓微细的器件制造技术与设计规则,对世界上所有的电子设备的集成化、多功能化、高品质化、小型化以及低成本化作出了重要贡献。这种半导体技术的发展,并未因电子设备的更高需求而止步。

可以像表 1.1 那样对半导体器件进行分类。表征这些半导体器件集成度的指标是器件数(晶体管数目)。从几百万个器件集成在一个固体组件(LSI 芯片)上的系统 LSI/微处理器/存储器/定制 LSI,到几万至几百万个器件的专用 IC/LSI,几十至几千个器件的通用逻辑 IC/通用线性 IC,以及几百个器件以下的分立器件/光半导体器件等,种类繁多。

半导体器件中,将众多电路集成起来的叫做集成电路/集成器件,称为 IC(Integrated Circuit)或者 LSI(Large Scale Integrated Circuit)。图 1.1 示出半导体器件的集成化的发展情况。

半导体器件大致可分为两种电路/制造技术。

(1) 双极电路/制造技术。

(2) MOS 电路/制造技术。

这两种技术中,有双极被 MOS 所取代的倾向。这是因为后者在电气性能(功率消耗、低电压工作等)、制造成本及电路/制造技术的标准化(适于大量生产不同品种的产品)等方面具有优势。

1) $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ 。

表 1.1 半导体器件的种类

系统 LSI(SoC)	将微处理器、存储器、模拟、数字等各种半导体器件集成在一个芯片上
微处理器(数字 LSI)	CISC(复杂指令集·计算机) RISC(精简指令集·计算机)
存储器	RAM(Random Access Memory) ROM(Read Only Memory)
定制 LSI(数字 LSI)	全定制, 门阵列, PLD(Programmable Logic Device)
专用 IC/LSI(模拟·数字 LSI)	影像用 IC, 音响用 IC, 通信用 IC, 特定用途 IC
通用逻辑 IC(数字 IC)	TTL, CMOS
通用线性 IC(模拟 IC)	OP 放大器, 比较器, 调节器, 驱动器 IC
光电半导体器件	LED, 半导体激光器, 光耦合器, CCD, CMOS 传感器
晶体管(分立器件)	双极晶体管, FET, GaAs 晶体管
二极管(分立器件)	整流二极管, 肖特基势垒二极管, 稳压二极管

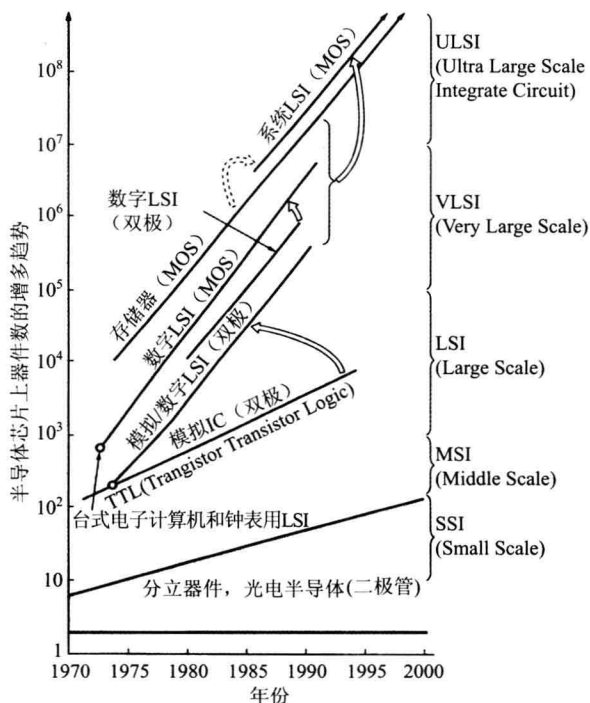


图 1.1 半导体器件的集成化发展

集成度高的器件,应用在数字信号的高速信号处理及运算处理,记忆大量信息的存储器等方面。集成度低的器件分立器件,应用于处理大功率的电源和保护电路,发送和接收高效率且具有良好噪声特性的电波的高频电路,以及传



传感器和光源等方面。

在数字器件与模拟器件两者之间,还有把从传感器之类接收到的模拟信号用数字信号进行处理、输出的模拟-数字变换器件,以及把来自微处理器等的数字信号变换为模拟信号,用来控制电动机、继电器之类的数字-模拟变换器件。一般来说,这些器件由于难以通用化和标准化,通常是按照用户的要求进行设计和制造,往往不是定制 LSI。

半导体器件也可以像图 1.2 那样按器件制造(工艺技术)分类。半导体器件的衬底材料主要有单质半导体硅和化合物半导体。硅半导体占了半导体器件的大部分,按制造技术可以分为 CMOS、双极、Bi-CMOS。GaAs 等化合物半导体器件与硅半导体器件相比,能够更高速地处理信号,不过衬底材料的价格高,因此,通常作为电波的发射、接收等方面的特殊器件使用。

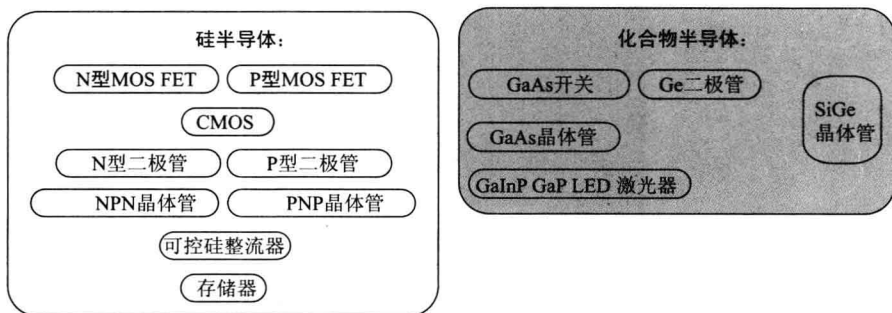


图 1.2 半导体器件按工艺技术分类

1.2 CMOS 器件的特征

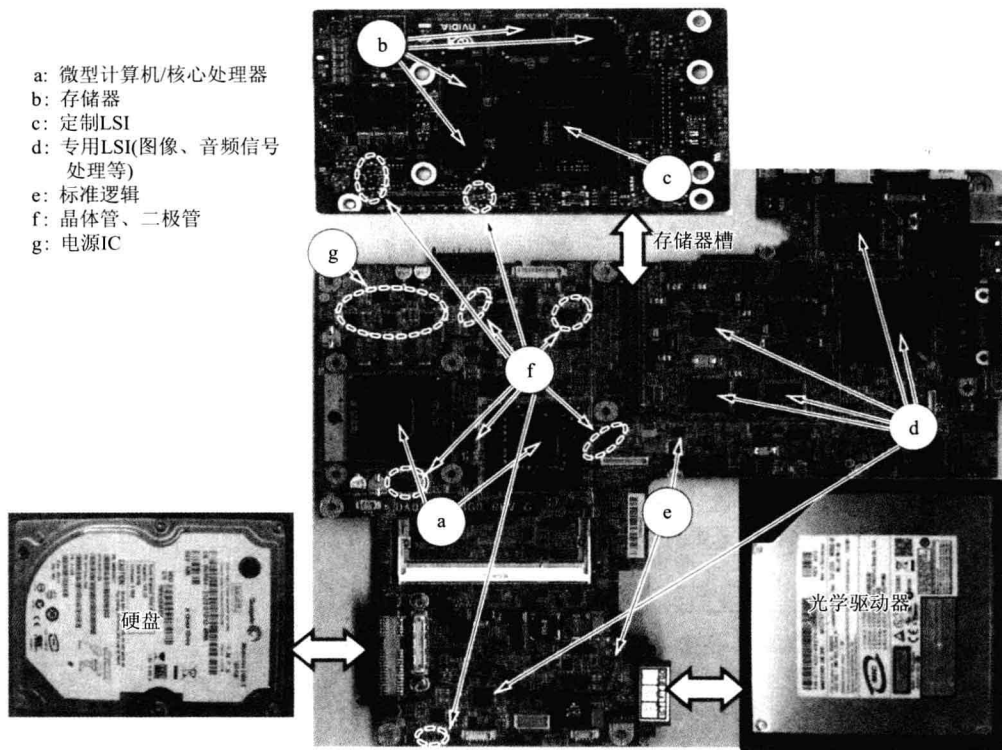
CMOS 器件具有消耗功率少、能够在低电压下工作、噪声余量大等优点。现在,CMOS 器件技术的进步已经肩负着半导体器件发展的重任。如图 1.1 所示,CMOS 器件的前身 MOS 器件(N-MOS,P-MOS)在 1970 年诞生时,应用在液晶显示的台式电子计算机和钟表方面。能够用于电池长时间驱动的电子设备才刚刚问世。

MOS 器件进化到 CMOS,才开始与使用电池的手提式电子设备的发展建立起密切的关系。到了 1980 年,开始应用在文字处理机、无线电话、录像机、照相机中。1990 年,笔记本电脑出现,2000 年片上系统(SoC)出现,从便携式电话、数码照相机开始,不仅是移动式设备,几乎所有电子设备都采用了 CMOS。



照片 1.1 显示出笔记本电脑中使用的各印制电路板。它由微型计算机/核心处理器,存储器,定制 LSI,专用 LSI,标准逻辑,晶体管、二极管(分立),电源 IC 组成。

如从照片上看到的那样,半导体器件被黑色树脂所覆盖,只露出若干管脚/引线(电极)。最近的超小型封装中,从上面看不到引线,它隐蔽在树脂下面。



照片 1.1 电脑中的印制电路板的例子

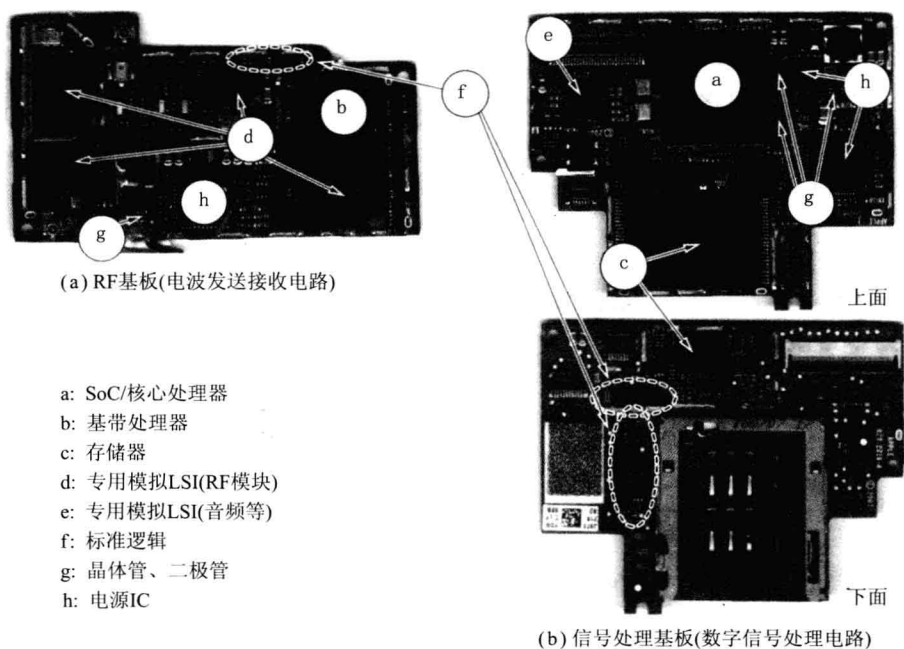
照片 1.2 显示的是苹果公司的便携式电话 iPhone 的印制电路板。上面搭载着:片上系统(SoC)/核心处理器,基带处理器,存储器,专用模拟 LSI,标准逻辑,晶体管(分立),电源 IC 等。

这个基板,分为发射/接收电波的电路模块和进行模拟/数字信号处理的电路模块。细小的电子部件配置在狭窄的空间里。与笔记本电脑相比,它已经进入更高的集成度和小型封装。但是,仍然使用了标准逻辑和分立器件。

便携式电话的小型化是必然的趋势,它对半导体器件的小型化、薄型化提出了更高的要求。它使用的大部分半导体器件,已经不能从上面确认电极/



引线,它采用将引线隐藏在树脂下面的无引线封装(Leadless Package)和球栅阵列封装(BGA)。



照片 1.2 便携式电话的印制电路板例子

表 1.2 归纳出 CMOS 器件的优点和缺点。第一优点就是省电。即使接上电源,不工作时的消耗电流(静态消耗电流)也非常小,当工作电源电压低时也具有高速响应能力。在以笔记本电脑、便携式电话的微处理器为开端的大规模集成电路中,一般都能够能够在 1.8V 以下的低电压下工作,也能平行地进行高速数据处理。

CMOS 器件能够获得大的噪声余量,不容易在外来噪声影响下发生误动作。所以,在追求可靠性的重要的产业设备、交通领域、生活基础设施等领域,从 1980 年以后得到大量应用。

从制造厂家的角度看,也是非常重要的。CMOS 器件擅长处理数字信号。它的逻辑电路部分,即使进入制造技术的微细化,过去已有的资产也能有效地得到应用。如果汇集设计基准和制造技术的关键技术,就能够进一步扩展各种功能和性能,有效推动各种产品在世界各地的标准化以及制造厂家之间的有效协作,从而低成本、大批量地满足市场需求。

CMOS 器件的缺点是静电损坏、门锁现象和响应速度慢。这些课题可以从



电路设计/版图设计技术、制造技术、保护电路技术等多方面得到克服。近年来,又出现一些新的大课题,如高速器件中特有的噪声的产生、噪声引起的误动作等。

另外,伴随着设计规则的微细化,器件的耐压下降。1.8V 驱动的 LSI 中,就连一般的电子设备所使用的 5V 电压,如果直接加上去,都会引起器件的劣化或损坏。在 CMOS 器件性能提高的同时,器件的使用者对于这些新出现的缺点,需要有清楚的认识和把握。

表 1.2 CMOS 器件的优缺点

优 点	缺 点
功率消耗低(省电)	抗静电能力弱
工作电压低	闩锁现象
噪声余量大(抗噪声能力强)	
高集成化、标准化(质量、成本)	

1.3 CMOS 产品的种类和特点

如图 1.3 所示,CMOS 产品大致可以分为逻辑 IC、模拟(线性)IC 和存储器。逻辑 IC 中包括标准逻辑 IC、PLD(Programmable Logic Device,可编程逻辑器件)、ASIC(Application Specific IC,专用集成电路)/定制 LSI、专用 IC、微处理器、DSP(Digital Signal Processor,数字信号处理器),以及系统 LSI 等。



图 1.3 CMOS 产品的大分类

模拟 IC 中,有 OP 放大器、比较器、A-D(Analog-Digital)变换器、D-A 变换器、电源电路等的单体的通用模拟 IC,以及与数字电路组合使用的专用 IC 电路。

存储器大体上可以分为不挥发性存储器(ROM:Read Only Memory)和挥发性存储器(RAM:Random Access Memory),还可以进一步按功能和性能做更细致的分类。

这里仅按功能和性能分类介绍逻辑 IC 与存储器。关于模拟 IC,不管是通



用 IC, 还是专用 IC, 由于用途和规格的特定化/专用化, 所以本书将不作详细介绍。但是, 在逻辑 IC 中, 对于被称为数字信号处理器 (DSP: Digital Signal Processor) 的把模拟信号数字化、进行信号处理的 IC, 将简要介绍其典型产品。

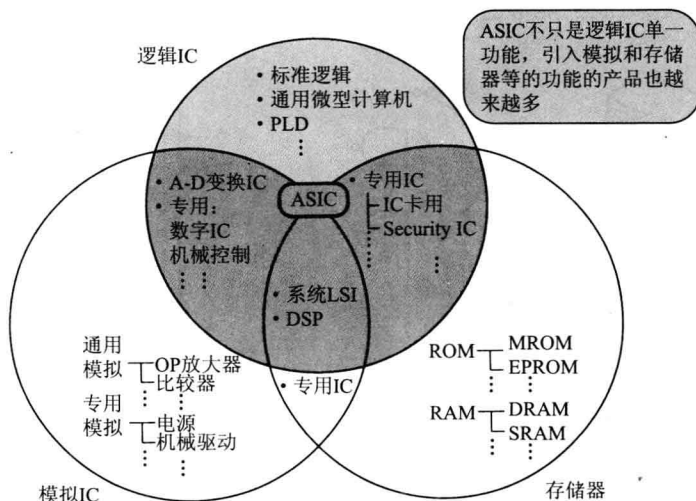


图 1.4 CMOS 产品的细致分类

逻辑 IC 如图 1.5 所示, 可以分为标准品、半定制集成电路 (SCIC: Semi-Custom IC) 和全定制集成电路 (FCIC: Full-Custom IC)。就是说, 可以定义为专用集成电路 (ASIC: Application Specific IC) 的产品的范围非常广泛。当 ASIC 的称呼刚诞生时, 是指用门阵列、标准单元 (standard cell)、IP 核单元 (IP core cell) 等单元基 (cell base) 开发的制品。现在, 已经把 DSP 和系统 LSI 包括在内。

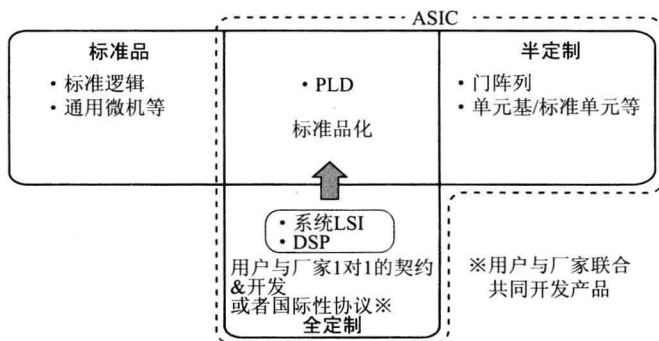


图 1.5 逻辑 IC 的分类

标准逻辑, 顾名思义, 是指产品化的单纯的逻辑电路 (图 1.6)。有反相器、NAND、AND、NOR、OR 等最小逻辑构成的门电路产品, 还有能够将它们组合起